

実はこんなに謎だらけ

# 地球 大解剖

地震や火山などの地殻変動を引き起こす「プレート」の動きの原動力は何なのか？ 地球の体積の約8割をしめるマントルは、どんな鉱物でできているのか？ 地球の中心にあるコアは、どのように流動しているのか？ 地球の内部を調べるための方法はかぎられており、私たちの足元に広がる世界には、実はわかっていない謎がたくさんあります。この特集では、謎だらけの地球内部を徹底解剖します。地球の構造やその歴史にひそむ、壮大なスケールのミステリーをお届けしましょう。

監修 廣瀬 敬

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻教授





# 私たちの足元に広がる世界は 実は謎だらけ

**大**きな地震や噴火がおきたとき以外に、地球内部の世界について考える機会は少ないかもしれません。地球の内部はいったいどのような構造をしているのでしょうか？これまで何がわかっていて、どんな謎が残っているのでしょうか？

## 地球はゆで卵のような構造をもつ

最新の研究にもとづく地球のモデルによれば、地球の構造はできている物質のちがいで「地殻」「マントル」「コア」という三つの層に分けられます(右のイラスト)。この構造はゆで卵によく似ています。地殻はゆで卵の殻に、マントルは白身に、コアは黄身に相当します。

地殻は厚さ6~30キロメートルの岩石(鉱物の集合体)の層です。地殻の厚さは、地表から地球の中心までの距離(約6400キロメートル)のわずか1%未満です。

マントルは、地殻より密度の高い岩石の層です。マントルは、地殻の底から約2890キロメートルの深さまでつづいています。マントルがとけて液体状になったものがマグマです。地殻とマントルの最上部を合わせた部分が「プレート」とよばれます。

2890キロメートルよりも深い場所がコアです。コアは主に金属の鉄でできています。コアは「外核」と「内核」にわけられ、外核は液体の鉄、内核は結晶化した固体の鉄です。

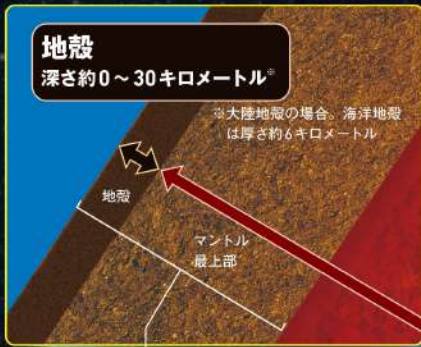
くわしくは次の見開きで解説しますが、地球に深い穴を掘ってマントルとコアの物質を直接採取することは、現時点ではできていません。そ

のため、マントルとコアについては多くのことが解明されていません。とくにコアについては謎が多く、どんな物質からできているのかすらも十分にわかっていません。

本特集では地球の内部に関するさ

まざまな謎を紹介するとともに、それらの謎を解くための最新理論や研究成果について解説します。とくに後半では、地球の起源、つまり地球が誕生した約46億年前~約45億年前の出来事に注目します。地球がどの

ように形成されたのかを知ることで、現在の地球をより深く理解できるようになることでしょう。



プレート(地殻+マントル最上部)

**マントル**  
深さ30~2890キロメートル

## 地球の内部構造と未解明の謎

地球内部の大まかな構造をえがきました。地球の構造は大きく、地殻、マントル、コアの三層に分けられます。また、図中に本特集で解説する地球の謎の一部を示しました。



地球の水はどのようにして  
もたらされた?→30ページ



生命はどのように  
誕生した?→38ページ

海  
大陸プレート  
海洋プレート



マントルはどんな鉱物でできている?  
→20ページ



マントルの「巨大低速度領域」の正体は?  
→28ページ



マントルの対流はどのようにおきる?  
→36ページ



マントルサンプルの直接採取は可能か?  
→16ページ



プレートはなぜ動く?  
→18ページ

コアによって温められたマントルの上昇流



地磁気はなぜ逆転する?  
→22ページ



コアは何の元素でできている?  
→24ページ



内核の自転はなぜ速い?  
→26ページ

外核(液体の鉄)

内核(固体の鉄)

**コア**  
深さ2890~6370キロメートル

## 謎 マントルサンプルの直接採取は可能か？

# 人類は地球の表面を薄くおおう「地殻」すら掘り抜けていない

ロシア（当時ソ連）が科学調査を目的に1970年から20年以上をかけて掘削を行い、その深さは12キロメートルに達しました。しかし、それは地球の大陸地殻の厚さ（約30キロメートル）の半分にも満たず、地表から地球の中心までの距離（約6400キロメートル）のわずか1%未満にすぎません。地球をゆで卵にたとえるなら、人類はまだゆで卵の殻に傷をつける程度のことしかできていないといえるでしょう。

### 日本の掘削船で海底地殻を掘り抜く

では、人類が地殻を掘り抜き、マントルに到達することは不可能なのかといえば、そうとはかぎりません。地殻には大陸地殻と海洋地殻の二種類があります。海の底にある海洋地殻の厚さは約6キロメートルで大陸地殻より薄いため、マントルまで掘り抜ける可能性があるのです。

たとえば、日本の海洋研究開発機構（JAMSTEC）が保有する地球深部探査船「ちきゅう」は、海底約7キロメートルの深さまで掘ることができると期待されています（右の写真）。ちきゅうのドリルパイプの先端には、硬い岩盤をつらぬけるようにダイヤモンドがとりつけられています。現時点で「ちきゅう」が到達した最高の深さは海底下3058.5メートルで、これは2014年1月に達成されました。

### 地表にいながらでもマントルの岩石は手に入る

地殻を掘り抜かなければマントルの岩石がまったく手に入らないわけではありません。地表にいながら、マントルの岩石を採取する方法があります。実はプレートどうしがぶつかって片方がめくれ上がり、マントルの岩石が地表に露出することがあります（右ページ下のイラスト）。たとえば北海道の日高山脈にある幌満峡では、マントル上部の岩石である「カンラン岩」が約8キロメートルにわたって露出しています。

また、火山のマグマ噴出によって、マントルの岩石が地表に運ばれてくることもあります。たとえば、秋田県の男鹿半島にある一ノ目淵という火山湖の周辺では、マントルに由来する岩石がごろごろとこぼれています。ただし、マグマの噴出によって運ばれてくる岩石の深さは約200キロメートル（地球の半径の約3%）が最大であり、それより深くにあるマントルの岩石を直接調べることは困難です。

### 地球深部探査船ちきゅう

海洋研究開発機構（JAMSTEC）が保有する地球深部探査船「ちきゅう」の写真です。ちきゅうには9.5メートルのドリルパイプが1000本積まれており、これらをすべて連結させると9.5キロメートルの長さになります。水深2.5キロメートルの海底から連結したドリルパイプをつると、最大7キロメートルの穴を掘れることになり、理論的には約6キロメートルの海洋地殻を掘り抜くことができます。

### マントルの岩石が地表に露出するまで



1.大陸プレートどうしが衝突

マントル最上部が地表に露出（例：北海道幌満峡）

2.プレートがめくれ上がる

カンラン石



### みどり色に輝くカンラン石

上にカンラン石の写真を示しました。カンラン石は、マントル最上部のカンラン岩の主要な構成鉱物です。オリーブ（olive）のような黄緑色をしていることから、英語ではolivineとよばれます。大陸プレートどうしが衝突してめくれ上がった場所（左のイラスト）では、マントル上部のカンラン岩が地表に露出しています。

## 謎 プレートはなぜ動く？

### プレート運動の原動力を説明する二つの仮説とは？

**地** 球は十数枚の「プレート」でおわれています。プレートは地球の表面を年間数センチメートルの速度でゆっくりと動いており、プレートの運動が地震や火山活動などのさまざまな地学現象の原因となっています。この理論を「プレートテクトニクス」といいます。

#### プレート運動の原動力は実は不明

プレートテクトニクスは1967年に確立された理論ですが、今でもまだ多くの謎が残されています。その一つが、プレート運動がおきる原因です。これに関しては二つの重要な仮説が提唱されています。

一つは「マンテル対流説」です。マンテルは固体ですが、長い時間スケールでみるとゆっくりとした流れで流体のようにふるまう「粘弾性」という性質があります。マンテルはコアによってあたためられ、地表で冷やされるので、深部と地表の間に、大規模な熱対流がおきています。このマンテルの熱対流がプレート運動の原動力になっていると考えるのがマンテル対流説です（左上のイラスト）。

もう一つの仮説は「テーブルクロス説」です。プレートには海底にあ

る「海洋プレート」と大陸をつくる「大陸プレート」の二種類があります。海洋プレートは海水によって冷やされて収縮すると密度が大きくなり重くなります。沈みこんだ海洋プレートの重みに引きずられることでプレート運動がおきると考えるのが、テーブルクロス説です（左下のイラスト）。

東京大学で地球科学を研究する廣瀬敬教授によれば、いずれの説も部分的には正しいといえます。たとえば、太平洋のプレートの動きはテーブルクロス説で完璧に説明できます。一方、大きな海溝（海洋プレートが大陸プレートに沈みこむ場所）がない大西洋のプレートの動きの説明には、マンテル対流説が有効です。いずれも有力な仮説ですが、この二つの仮説だけで地球のプレート運動を完全に説明できるわけではないため、さらなる研究の進展が必要なのです。

#### 二つの仮説に共通する「海」の存在

いずれの仮説にも共通する重要なポイントがあります。それは、プレート運動の鍵は海水にあるということです。海水がなければマンテルの熱対流は効率的におきません。また、海洋プレートが大陸プレートの下に沈みこむこともありません。

つまり、海がなければプレート運動はおきないと考えられます。実際、海がない現在の火星や金星では、地球のようなプレートの運動がないことが知られています。海水がどうして地球に存在するかについては、30ページで解説します。

#### マンテル対流説

流体において高温と低温の部分がそれぞれ上下に入れかわるようしておきる対流のことを「熱対流」といいます。マンテル上部の層は海水によって冷えて収縮し、重くなる（密度が上がる）ため、下部に沈みこんでいきます。一方、下部マンテルの層はコアに温められて膨張し、軽くなる（密度が下がる）ため、上部に浮き上がっていきます。こうしたマンテルの熱対流に引きずられてプレートが運動します。

コアで温められて軽くなったマンテルの上昇流

海水によって冷えて重くなったマンテルの下降流

#### テーブルクロス説

海底をつくる海洋プレートは海水によって冷やされると収縮し、重くなります。すると、その重みによってプレートは大陸プレートの下に沈みこみます。海洋プレートの重みに引きずられてプレートの運動がおきると考えるのがテーブルクロス説です。

海水によって冷えたプレートの重みに引きずられる

#### マンテル対流説とテーブルクロス説

プレートの動きの原動力を説明する二つの仮説として「マンテル対流説」と「テーブルクロス説」をえがきました。いずれの仮説も部分的には正しく、一つの仮説だけでは地球のプレート運動をすべて説明することはできません。

## マントル最下層の鉱物「ポストペロブスカイト」。その性質とは？

マントル深部の鉱物を直接調べることは困難です。しかし地球科学者たちは、さまざまな方法を使ってマントルを構成する鉱物の正体を解明してきました。その方法の一つが、地震波の観測です。

地球内部でおきた地震の振動（地震波）は、マントルなどの岩石（鉱物の集合体）を通過して地表に届きます。地表で観測される地震波は、それが通過する鉱物の種類によって伝播速度が変わります。そのため、深さごとの地震波の速度のちがいを調べることで、マントルの構造をだまかに予測できるのです。長年の地震波の観測によって、マントルは四種類の層に分かれていることがわかっています。

### 結晶構造の「相転移」を 実験室で再現

実はマントルの四つの層は、いずれも主にケイ素（Si）、酸素（O）、マグネシウム（Mg）、鉄（Fe）からできています。地球は深くなるほど圧力が高くなります。そして、同じ元素でできた鉱物でも高圧にさらされると、より密な結晶構造に変化し、その性質が大きく変化することがあります。これを「相転移」といいます。マントルの四つの層のちがいは、その結晶構造にあります。

このことを明らかにしたのが、地球科学者が長年行ってきた「高温高圧実験」です。これは、地球の内部と同じ高温・高圧の環境を実験室で再現することで、地球内部の物質を

人工的につくりだすという方法です。たとえば、マントルのいちばん上の層である「上部マントル」と二番目の層である「マントル遷移層」の境は、深さ約410キロメートルです。この深さの圧力は約14万気圧（1気圧は地表での大気圧）、温度は約1500℃です。上部マントルの主要鉱物であるカンラン石に14万気圧以上の高圧をかけると、「ウォズリアイト」という密度の高い結晶構造をもつ別の鉱物に相転移します（右のイラスト）。ウォズリアイトこそがマントル遷移層の主要鉱物です。

高温高圧実験によってマントル遷移層の鉱物が発見された（合成された）のが1950年代後半のことです。1974年には、下部マントル（深さ約660～2600キロメートル）の主要鉱物「ブリッジマナイト」が発見されました。しかし、最後に残ったマントルの最も深い最下部マントル（約2600～2900キロメートル）は、気圧が100万気圧以上にもなり、実験室で再現するのはむずかしく、30年以上手がかりがない状況でした。

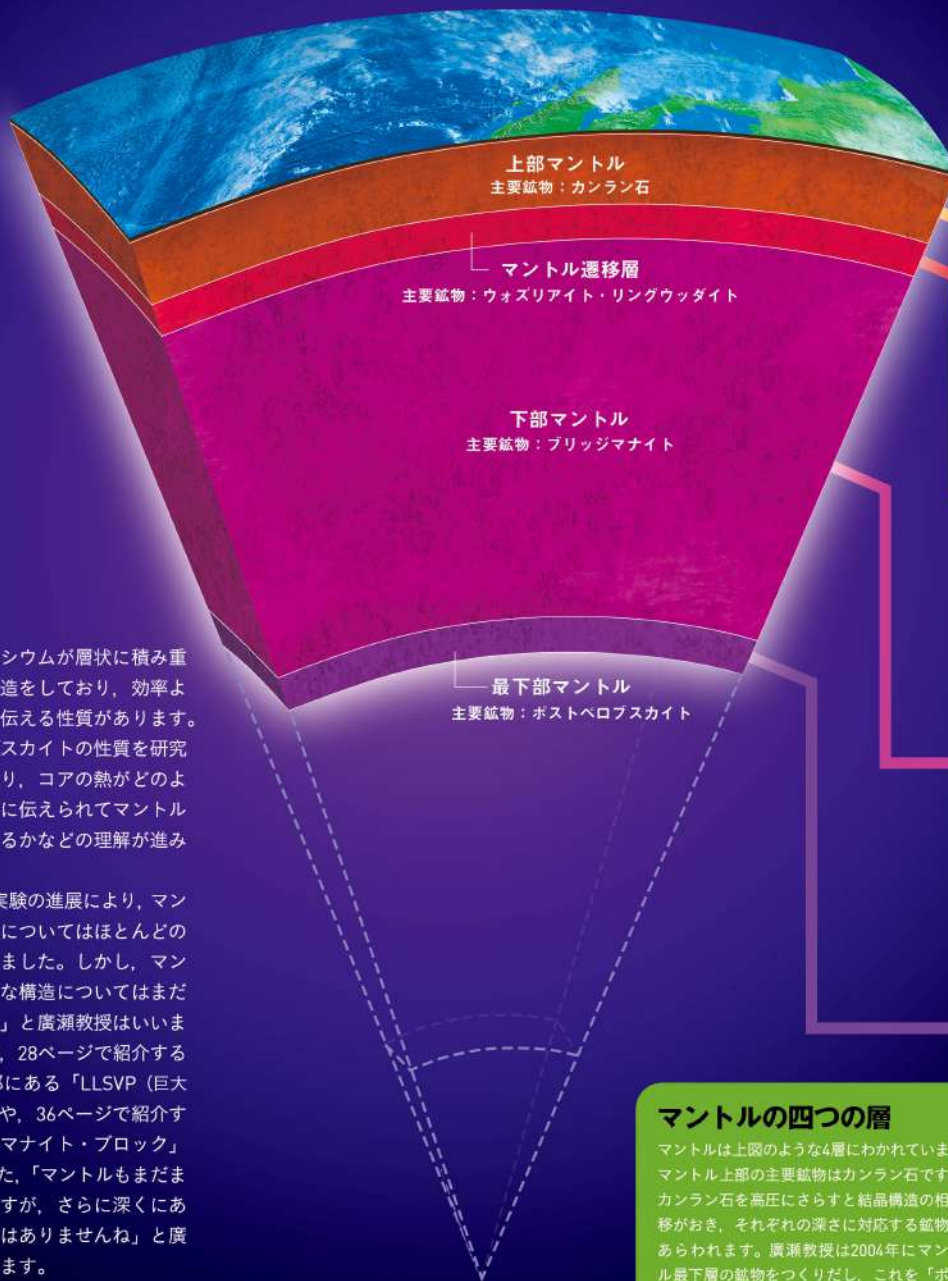
### コアの熱をよく伝える ポストペロブスカイト層

そんな中、廣瀬教授の研究チームは2004年に最下部マントルの主要鉱物である「ポストペロブスカイト」をつくりだすことにはじめて成功しました。これによって、マントルの主要な四つの層がどんな鉱物でできているかが明らかになったのです。

ポストペロブスカイトは、 $\text{SiO}_2$ 八

面体とマグネシウムが層状に積み重なった結晶構造をしており、効率よく電気や熱を伝える性質があります。ポストペロブスカイトの性質を研究することにより、コアの熱がどのようにマントルに伝えられてマントルの対流がおきるかなどの理解が進みました。

「高温高圧実験の進展により、マントルの大構造についてはほとんどのことがわかりました。しかし、マントルの局所的な構造についてはまだ謎があります」と廣瀬教授はいいます。たとえば、28ページで紹介するマントル下部にある「LLSVP（巨大低速度領域）」や、36ページで紹介する「ブリッジマナイト・ブロック」などです。また、「マントルもまだまだ謎は多いですが、さらに深くにあるコアほどではありませんね」と廣瀬教授は語ります。

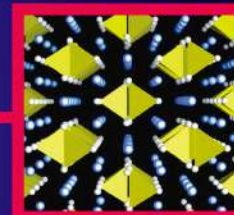


### 四つの層の結晶構造

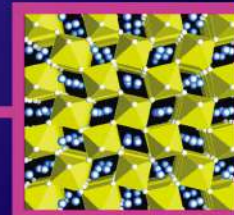
提供：館野繁彦氏



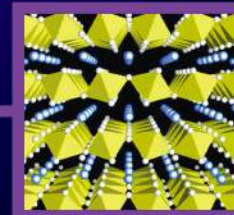
カンラン石



スピネル構造



ペロブスカイト構造



ポストペロブスカイト構造

### マントルの四つの層

マントルは上図のような4層にわかれています。マントル上部の主要鉱物はカンラン石です。カンラン石を高圧にさらすと結晶構造の相転移がおき、それぞれの深さに対応する鉱物があらわれます。廣瀬教授は2004年にマントル最下層の鉱物をつくりだし、これを「ポストペロブスカイト」と命名しました。